

15 ЛЕТ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИОНОЗОНДОВ ФГБУ «ИПГ» НА СОЛНЕЧНО-СИНХРОННОЙ ОРБИТЕ

А.В. Тертышников

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»), Москва, Россия; e-mail: atert@mail.ru

Аннотация. Первым ионозондом на КА серии «Метеор» был радиочастотный масс-спектрометр «РИМС-1». В 2014 г. его заменил РИМС-2. Этими приборами зондировалась плотность ионов верхней атмосферы на орбите КА серии «Метеор». В 2023 г. был запущен обновленный РИМС, в котором за счет современной микроэлектроники удалось повысить качество измерений ионного состава верхней атмосферы. Усовершенствованный радиочастотный ионозонд функционирует на КА «Метеор-2-3» и «Метеор-2-4». Рассмотрена конструкция ионозонда и полученные решения для накопленных данных измерений.

Введение

В России с 2009 г. плотность ионов верхней атмосферы регулярно зондировалась с КА серии «Метеор» на основе принципов радиочастотной масс-спектрометрии [1]. Первым ионозондом на КА серии «Метеор» был прибор РИМС-1. В 2014 г. его заменил РИМС-2 [1]. На смену ему с 2023 г. был запущен масс-спектрометр космический (МСК) [1]. За 15 лет функционирования на солнечно-синхронной орбите были накоплены огромные массивы измерений [2]. Кстати, ионозонды для КК «Ионозонд», предназначенные для измерения профилей плотности электронов, также прошли внешнее проектирование в ФГБУ «ИПГ», как и ионозонды вертикального зондирования для Ионосферно-магнитной службы Росгидромета. В последних вариантах исполнения космических ионозондов ФГБУ «ИПГ» на основе принципов радиочастотной масс-спектрометрии за счет современной микроэлектроники удалось существенно повысить качество измерений ионного состава верхней атмосферы.

Для зондирования плотности электронной концентрации в ионосферной плазме на орбите КА активно используется в качестве первичного преобразователя зонд Лэнгмюра [3, 4], которым оценивают проводимость плазмы, связанную с количеством свободных электронов, но при некоторых нефизичных предположениях, например отсутствии магнитного поля в ионосферной плазме и др. При этом, считается, что концентрация электронов в ионосфере примерно равна концентрации положительно заряженных ионов. Отрицательных ионов в слое выше 250 км мало. Однако, при сопоставлении электронной и ионной концентраций возникают несоответствия электрической квазинейтральности ионосферной плазмы [5].

Принципы радиочастотной масс-спектрометрии ионного состава верхней атмосферы были реализованы за рубежом на масс-спектрометрах КА AE-B, Ogo 6, San Marco 3, Eros A и AE-C и др., а с 2005 г. с КА DMSP-6 [3]. Для верификации масс-спектрометрических измерений использовались данные ракетных экспериментов [3] и радары некогерентного рассеяния (Аресибо, Хикамарка, Миллстоун и др.).

Многолетнее зондирование ионной компоненты верхней атмосферы ионозондами ФГБУ ИПГ на КА типа «Метеор» соответствует тенденции использования зарубежных масс-спектрометров (прибор «IAP») на КА DEMETER и его аналога – прибора «PAP» на China Seismo-Electromagnetic Satellite. Зарубежные масс-спектрометры также используются в качестве ионозондов. Калибровка по нейтральной компоненте не валидирована. Получаемые данные зондирования полезны для верификации моделей ионосферы и данных зондирования ионосферы ионозондами КК «Ионозонд».

Схема ионозонда

Состав ионов зависит от высоты [7]. В диапазоне высот 200–700 км основным ионом является ион O^+ (16 атомных единиц массы, а.е.м.). Сумма количества других ионов на порядок меньше. Выше 700 км проявляются эффекты гравитационного разделения газовых компонент, увеличивается доля ионов с атомной массой 1, 2 и 4. Выше 850–1250 км увеличивается угроза столкновения ионозонда с космическим мусором [8], что учитывается при выборе орбит КА и возможности зондирования ионного состава верхней ионосферы и плазмосферы Земли.

Диагностика концентрации основных (одного-трех) ионов (O^+ , H^+ , He^+), преобладающих среди других ионов по наибольшей доле в конкретном диапазоне высот, – потенциальное решение для зондирования концентрации электронной плотности в ионосферной плазме. Квазинейтральность ионосферной плазмы

обуславливает возможность пересчета диагностируемых концентраций превалирующих ионов в концентрацию электронов.

В отличие от прототипа [1], в ионозонде используется комплекс из нескольких первичных преобразователей, настроенных на атомные массы основных ионов ионосферы (рис. 1).



Рисунок 1. Схема составляющих ионозонда: 1, 1*...1** – первичные преобразователи, 2 – блок питания, 3 – блок управления, 4 – блок обработки данных, 1.1 – ловушка, 1.2 – селектор, 1.3 – мишень.

Количество первичных преобразователей зависит от диапазона высот зондирования. На высотах 200-600 км или выше 1500 км достаточно не менее одного первичного преобразователя (анализатора ионов, 1, 1*...1**), блок питания, блок управления, блок анализа.

Основными элементами анализатора (блока 1) являются: ловушка ионов, селектор, мишень. Ловушка (1.1 на рис. 2) обеспечивает формирование потока ионов на селектор.

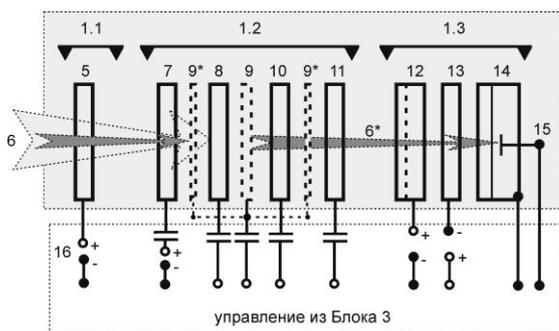


Рисунок 2. Схема первичного преобразователя: 5 – сетка ловушки входного отверстия, 6-6* – направление потока ионов, 7 – первая сетка селектирующего каскада, 8 – вторая сетка, 9 и 9* – цилиндры для сигналов от генератора высокой частоты, 10 – третья сетка, 11 – четвертая сетка селектирующего каскада, 12 – сетка задержки, 13 – антиэлектронная сетка, 14 – экран, 15 – мишень с коллектором-катодом, 16 – ключ.

Поток ионов (6 на рис. 2) за счет движения носителя ионозонда по орбите проходит через входное отверстие и вытягивается отрицательным потенциалом вытягивающей сетки во входном отверстии в селектор (1.2), состоящий из каскада сеток. Из селектора поток диагностируемого иона попадает на мишень (1.3). По величине катодного тока с мишени оценивается концентрация диагностируемого иона. Электрический потенциал на сетке входного отверстия 5, относительно корпуса анализатора, обеспечивает затягивающее, либо экранирующее поле для заряженных частиц атмосферы в области зондирования, что необходимо для калибровки или при заданном режиме зондирования – анализа проб ионосферной плазмы.

В селектирующем каскаде сеток 7–11 на фиг. 3 поток ионов 6-6* проходит через заряженные сетки (7–8 и 10–11), цилиндры задержки 9-9*, на которые подаются сигналы от генератора высокой частоты для селекции выбранного иона, сетку задержки 12, антиэлектронную сетку 13, через экран 14 на мишень-коллектор 15. При этом, положительные ионы ускоряются разностью потенциалов U между сетками 7 и 8 по направлению к сетке-цилиндру 9. Сетки 7, 8, 10, 11 расположены на одинаковом расстоянии S друг от друга.

Выбор S , U и частоту f подачи напряжения на сетки определяет настройку каскада селектирующих сеток анализатора на диагностику иона с массовым атомным числом M . Управляющая высокая частота f подается на сетку 9 от генератора, а управляющее напряжение U через ключи, которые связывают каскад сеток 7-8 с каскадом 10-11.

Особенностью является подбор S . Технологические требования обусловили использование фиксированных частот от генераторов частот и нескольких линеек напряжений U . При этом, высокая отрицательная чувствительность $\partial M/\partial S$ обуславливает внимание к выбору и точной настройке межсеточных расстояний для диагностики выбранного типа иона, как и для вариаций частоты ($\partial M/\partial f$). Снижение уровня U актуально для функционирования ионозонда и бортовой аппаратуры носителя ионозонда. Снижение уровня U для СВЧ-диапазона определяет возможность миниатюризации анализатора, настраиваемого на выбранную атомную массу иона.

Технологически выгодно использовать одинаковые f и U , а первичный преобразователь-анализатор изготавливать под конкретный тип иона. Размещение дополнительных сеток с другим межсеточным расстоянием в одном преобразователе увеличивает технологическую сложность изготовления и настройки ионозонда. Для ионозонда, как расходного материала, целесообразно использовать простую и дешевую схему.

Включение процессора в блок 3 позволяет задавать любые режимы (циклограммы) измерений, в том числе выключая ловушку через 16. При этом, в блоке управления возможно также использование многозарядной аналого-цифровой платы (АЦП) [9].

Корпус зонда негерметичный. Выходное отверстие зонда – это мишень-коллектор ионного тока 15, которого достигают диагностируемые ионы. Коллектор связан с устройством регистрации токов, соответствующих потоку достигших коллектора ионов. Датчики тока, связанные с АЦП, подключаются на выход 15, чтобы преобразовать значение ионного тока с коллектора в цифровой двоичный код.

Разрешающая способность регистрации количества селектированных ионов зависит от чувствительности датчиков ионного тока с коллектора. Современные микроэлектронные датчики позволяют фиксировать сверхмалые токи и достичь технического результата изобретения – повышение качества (точности, надежности и достоверности) измерений ионного состава ионосферы. При этом надо учитывать, что вариации электронной концентрации в невозмущенной ионосфере достигают десятков процентов [5, 10].

Ионозонд предназначен для автоматических контактных измерений концентрации не менее одного иона в ионосфере на орбите КА в разных гелиогеофизических условиях, времени суток. В первичном преобразователе актуальна возможность использования стабильной частоты и напряжения на сетке 9 для селекции выбранного иона. Это упрощает конструкцию блока управления, уменьшает поток обрабатываемых и передаваемых данных. Калибровка коллекторных токов в мишени зонда в наземных условиях осуществляется в барокамере низкого давления с калибровочной смесью ионов, где проводят измерения на соответствие катодных токов плотности диагностируемых ионов.

Стоимость действующего макета ионозонда, созданного на лампах прошлого века, оказалась на порядок дешевле серийных образцов масс-спектрометров прошлого века. Современные технологии изготовления многосеточных «ламп» анализатора позволяют удешевить и миниатюризовать конструкцию ионозонда. Форма выполнения элементов и устройств ионозонда определяются доступной элементной базой, имеющимися ресурсами.

Примеры результатов зондирования

На рис. 3 представлены результаты зондирования ионов O^+ , H^+ , N^+ , He^+ прототипом ионозонда – радиочастотным измерителем масс-спектра ионов (прибор РИМС-2) на орбите нисходящего (с северного полюса до южного полюса) утреннего полувитка КА «Метеор-2-2» 21.03.2021 г.

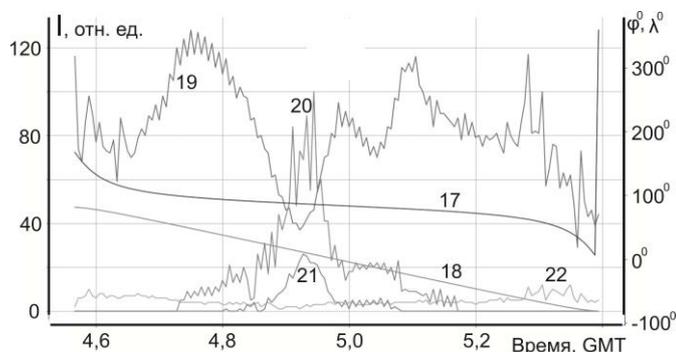


Рисунок 3. Результаты зондирования катодного тока ионов макетом ионозонда на утреннем полувитке КА «Метеор-2-2» 21.03.2021 г.: 17 – широта, 18 – долгота, 19 – O^+ , 20 – He^+ , 21 – H^+ , 22 – N^+ .

По оси абсцисс показано текущее время, а на графике уровень катодных токов и соответствующие географические широта и долгота подспутниковой точки (правая шкала ординат). В зонах аврорального овала есть небольшие всплески концентрации O^+ , которые зависят от вида (до 5 видов) полярных сияний. Пересечение магнитного экватора (вертикаль между числами 20 и 21) характеризуется локальным минимумом в концентрации O^+ и повышенным содержанием по H^+ и He^+ в единицах катодного тока оси ординат. Для каждого иона своя единица перевода катодного тока в концентрацию.

Для оценки пригодности данных измерений для зондирования электронной плотности ионосферной плазмы использовалась производственная модель ионосферы Росгидромета «SIMP-2», доступная для снятия измерений на сайте ФГБУ «ИПГ» [11]. При сопоставлении данных рис. 3 с результатами моделирования электронной концентрации n_e по модели SIMP-2 (широта, долгота, высота, время те же) коэффициент корреляции измерений концентрации иона O^+ по ионному току на утреннем витке КА «Метеор-2-2» оказался отрицательным. Это означает, что концентрация иона O^+ на витке достаточно стабильна. Для концентрации иона N^+ коэффициент корреляции $-0,48$. Но концентрация иона N^+ мала, составляя до нескольких процентов от концентрации иона O^+ , хотя увеличение иона N^+ совпало с положением зоны Южного аврорального овала.

Наибольшие коэффициенты корреляции с результатами моделирования электронной концентрации n_e по модели SIMP-2 продемонстрировали концентрации легких ионов: с атомными единицами массы 1 (H^+ , 0,52), 2 (H_2^+ , 0,59, но этого иона мало) и 4 (He^+ , 0,64), особенно в тропических и экваториальных широтах.

При сопоставлении данных были рассчитан ряд регрессионных моделей для нескольких диапазонов широт: от $81,50$ с.ш. до 54^0 градусов с.ш., тропики-экватор ($\pm 22^0$ широты), над экватором $\pm 5^0$ широты. В высоких и средних широтах на высотах 200-700 км для оценки электронной плотности могут быть использованы только измерения катодных токов по содержанию иона O^+ , над тропиками и экваториальными зонами выше 600 км могут быть использованы только измерения катодных токов по содержанию легких ионов с атомной массой 1 и 4, над экваториальными широтами измерения содержания иона H^+ . Выше 1300 км достаточно измерений содержания иона H^+ . Суммарная концентрация указанных ионов фактически определяет концентрацию электронов.

Значительные вариации стандартных ошибок в уравнениях регрессии не представляются критичными, так ионосфера и верхняя ионосфера характеризуется высокой изменчивостью, что подтверждают оценки невозмущенной ионосферы в $\pm 50\%$ от концентрации электронов в [10], а также результатами сравнения расчетных моделей электронной концентрации ионосферы SIMP-2 с усовершенствованной SIMP_{ус}, доступной по адресу [16], а также SIMP-2 с IRI в [7, 12]. Для модели SIMP_{ус} коэффициент при катодных токах для иона O^+ в северном полушарии увеличивается почти на 50% до 126, а для легких ионов в 5 раз. Различие между SIMP-2 с IRI в экваториальной зоне достигает 300 % и более. Что подчеркивает необходимость регулярной калибровки измерений и корректировки моделей электронной плотности ионосферы. Сложная морфология модельного пояса электронов над экваториальными широтами и несоответствие в сотни процентов с результатами измерений суммарной концентрации ионов отмечена также в [13].

По архивным данным зондирования ионного состава верхней атмосферы удалось решить ряд задач для климатических исследований ионосферы, диагностики границ одиннадцатилетнего цикла солнечной активности [14], что обеспечило национальную информационную независимость от Бельгийской королевской обсерватории и от Национальной солнечной обсерватории США. Получены статистические модели морфологии полярных шапок, аврорального овала и полярного ионосферного провала вблизи полюсов Земли [15], экваториальной токовой струи в ионосфере, откликов эффекта переполусовки солнечного магнитного диполя перед максимумом «11-летнего» цикла солнечной активности и др.

Для решения задачи диагностики сверхтяжелых ионов техногенного происхождения в верхней атмосфере целесообразно настраивать ионозонд на их атомную массу, либо использовать функционирующие масс-спектрометры.

Заключение

Таким образом, функционирующие на солнечно-синхронных орбитах ионозонды ФГБУ ИПГ, созданные на принципе радиочастотной масс-спектрометрии, позволяют решать актуальные задачи мониторинга верхней ионосферы.

Литература

1. Тертышников А.В. Масс-спектрометр космический. Патент № 2726186 по заявке № 2019121111/20(041262) в реестре ФИПС от 05.07.2019.
2. Пополняемая база спутниковых данных ионного состава верхней атмосферы на высотах 808–835 км от поверхности Земли на 2010–2014 года (часть 1, 2) / Саморуков В.В., Кирюшов Б.М., Репин А.Ю. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620207 (часть 1), № 2022621368 (часть 2). ФГБУ ИПГ.
3. Зонд Лэнгмюра / <http://www.optimum-lab.ru/product/zond-lengmjura-zl-t-tajfun/>
4. Лебедев Ю.А. Электрические зонды в плазме пониженного давления /

- <https://plazma.karelia.ru/pub/fntp/Lebedev.pdf>
5. Тертышников А.В., Сыроешкин А.В. и др. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения. Выпуск 1 (Проект). М., 2012 / http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-16688.pdf
 6. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F., Seran E., Peschard D., Gilbert P., Artru J. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER // *Planetary and Space Science*, V. 54, Is. 5, P. 487-501, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.018>
 7. Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., Altadill D., Reinisch B.W., Pignalberi A. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark // *Reviews of Geophysics*, V. 60, Is. 4, e2022RG000792, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022RG000792>
 8. Распределение космического мусора по высотам орбит / <https://infopedia.su/18x98ac.html>
 9. Побединский В. Внутри микроконтроллера. <https://habr.com/ru/articles/765498/>
 10. Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеевко Н.П. Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы. М., 1990. 72 с.
 11. Расчет состояния ионосферы по модели SIMP. Профиль электронной концентрации по модели SIMP2 / <http://space-weather.ru/#/simp>
 12. Международная эталонная ионосфера (IRI) / <https://www.spennis.oma.be/help/background/atmosphere/models.html>
 13. Biyan Chen, Hengrui Cao, Jinyong Wang, Jianping Huang, Zelang Miao. Comparison of electron density measurements from CSES and Swarm satellites with GNSS ionospheric tomography data // *Advances in Space Research*, V. 71, Is. 6, P. 2818-2832, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.040>
 14. Тертышников А.В. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент. Рег. № 2023135791 в реестре ФИПС от 27.06.2024. Заявл. 27.12.2023 г.
 15. Тертышников А.В. Способ зондирования границ аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Патент по заявке № 2023111370/28(024305) в реестре ФИПС от 02.05.2023 г.